



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE
INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA



Trabajo de fin de grado.

ESTUDIO TÉCNICO SOBRE APLICABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA SECA PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS DE ALIMENTOS EN BIOGÁS

*TECHNICAL STUDY ON APPLICABILITY OF DRY ANAEROBIA DIGESTION
TECHNOLOGY FOR THE CONVERSION OF FOOD WASTE IN BIOGAS*

Para acceder al título de:

Grado en ingeniería de los recursos mineros

Autor: Ana Isabel Llata Torre
Director: Carlos Rico de la Hera
Convocatoria: febrero 2020



INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	5
2. DESPERDICIO ALIMENTARIO	7
3. BIOGAS	9
4. INTRODUCCIÓN A LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	11
5. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	14
6. PARAMETROS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	16
6.1. Temperatura	16
6.2. Tipo de sustrato.....	17
6.3. Nivel de PH.....	18
6.4. Tiempo de retención.....	19
6.5. Relación C/N.....	20
6.6. Concentración de nitrógeno amoniacal.....	20
6.7. Rendimiento de metano	21
7. TIPOS DE TECNOLOGÍAS EN DIGESTIÓN ANAEROBIA	22
8. DIGESTIÓN ANAEROBIA SECA	24
9. SUPUESTO PRACTICO	26
9.1. Datos de partida	26
9.2. Diseño y construcción	26
9.3. Cultivo del inóculo	28
9.4. Digestores de garaje	31
9.5. Puesta en marcha	32
9.6. Datos del REACTOR 1	33
9.8. Datos del REACTOR 2	37
9.9. Parada de los reactores	40
10. COMPARACIÓN DE ESTUDIOS	42
10.1. Instalaciones y funcionamiento	42
10.2. Enfoque experimental y muestra de datos.....	44
10.3. Resultado final y conclusiones	48
11. CONCLUSIONES.....	49
12. BIBLIOGRAFIA	52
Trabajos citados	52



INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proporción de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Figura 5.1. Esquema de digestión anaerobia en materia orgánica compleja.

Figura 6.1. Relación entre la velocidad específica máxima de crecimiento y la temperatura en los distintos rangos de temperatura.

Figura 7.1. Clasificación de la tecnología de la digestión anaerobia.

Figura 7.2. Tecnología de la digestión anaerobia por vía seca.

Figura 8.1. Partes de una planta de digestión anaerobia seca.

Figura 8.2. Imagen en 3D de una planta de digestión anaerobia por vía seca.

Figura 9.1. Digestores tipo garaje fabricados en el taller.

Figura 9.2. Foto de los residuos de cafetería empleados para el crecimiento del inóculo.

Figura 9.3. Inicio y final del segundo batch para la creación del inóculo.

Figura 9.4. Instalación completa de los digestores tipo garaje.

Figura 9.5. Reactores cargados con residuos al inicio del proceso.

Figura 9.6. Producción diaria de metano en el reactor 1.

Figura 9.7. Producción acumulada de biogás y metano en el reactor 1.

Figura 9.8. Distribución de la producción de metano en el reactor 1.

Figura 9.9. Porcentaje de metano en el biogás generado en el reactor 1.

Figura 9.10. Producción diaria de metano en el reactor 2.

Figura 9.11. Producción acumulada de biogás y metano en el reactor 2.

Figura 9.12. Distribución de la producción de metano en el reactor 2.

Figura 9.13. Porcentaje de metano en el biogás generado en el reactor 2.

Figura 9.14. Vista del contenido de los reactores después del proceso de biometanización.

Figura 10.1. Vista de la planta de digestión anaerobia por vía seca en detalle.

Figura 10.2. Lectura del percolado.

Figura 10.3. Monitoreo del periodo de la composición del biogás.



INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Porcentaje de composición de los compuestos del biogás.

Tabla 4.1. Comparación de procesos por vía húmeda y vía seca.

Tabla 6.1. Intervalo de PH óptimo en la digestión anaerobia.

Tabla 9.1. Ciclos por día del reactor 1 para la recirculación del percolado.

Tabla 9.2. Ciclos por día del reactor 2 para la recirculación del percolado.

Tabla 10.1. Masa media de materia prima introducida en el reactor.

Tabla 10.2. Características químicas de la materia orgánica introducida en el reactor.



Estudio técnico sobre aplicabilidad de la tecnología de digestión anaerobia seca para la conversión de residuos de alimentos en biogás.



ABSTRACT

This study is intended to demonstrate that there are other types of feasible alternative energy sources. For this we will analyze and adapt to our present time, where wasteful consumption is in the order of the day. We will describe in detail the applicability of the science of dry anaerobic digestion, demonstrating that it is a type of neutral energy, non-polluting for the environment and that it is capable of supplying energy in a simple way.

While anaerobic wet digestion technology has been used with organic waste for years, dry fermentation is considered an emerging technique. This leads us to establish more specific parameters, which will help to optimize methane.

As a basis for this study we will rely on two recent articles. The first to be used at a laboratory level, and the second to be used at a larger scale. With the first, we will define more specific parameters, such as percolating circulation, PH levels, or recirculation cycles. With the second study of a large-scale plant, we will observe that we are faced with other problems, such as: how many cells are necessary to supply the energy we need at our current rate of consumption, the days necessary for the process to be stable, or the percolating and biogas readings generated.

In both analyses a solid conclusion will be reached on the essential parameters so that both projects can be done in a viable way. Arriving at a real solution on the problem that is wasted food. That is, taking into consideration the fact, that, if this waste is not treated, it ends up generating garbage and polluting our environment. With this process, we would avoid saturation of landfills and create a powerful source of energy through biogas.



1. INTRODUCCIÓN

Se habla mucho sobre el cambio climático y las posibles consecuencias que tendrán en un futuro venidero sobre la Tierra. Esto genera un exceso de información en cuanto a las consecuencias del calentamiento global, pero la inexactitud de las fuentes que consultamos y una desinformación ambiciosa por parte de los medios de comunicación hace que los adulterados mitos sobre el tema creen un gran desconocimiento entre nosotros.

Una de las causas del cambio climático es el calentamiento global. Este calentamiento esta provocado por diferentes orígenes. Los principales y más importantes van desde el aumento de los gases que provocan el efecto invernadero hasta la deforestación o el aumento de la población.

El incremento paulatino de la temperatura pone en peligro la flora y la fauna de la Tierra y por consecuencia directa nuestro entorno. Para ello tenemos que ser consecuentes con la dura realidad que generan las actividades derivadas del ser humano que están provocando algo que de manera natural no sucedería.

Es responsabilidad nuestra reducir los posibles impactos que de otra manera no tendrían lugar. Una de las acciones para mitigar este cambio es reducir y limitar las emisiones que producen gases como el dióxido de carbono o el metano.

Una forma de reducir estas emisiones son los medios de transporte eficientes o una mayor inversión en energías renovables. Como en nuestro caso podría ser el Biogás.



Uno de los gases que más daño hace al efecto invernadero es el metano. El metano (CH_4) es un gas incoloro, muy inflamable y no tóxico, que se produce de forma natural por la descomposición de la materia orgánica. Las principales fuentes de metano son los vertederos, el combustible fósil y la ganadería.

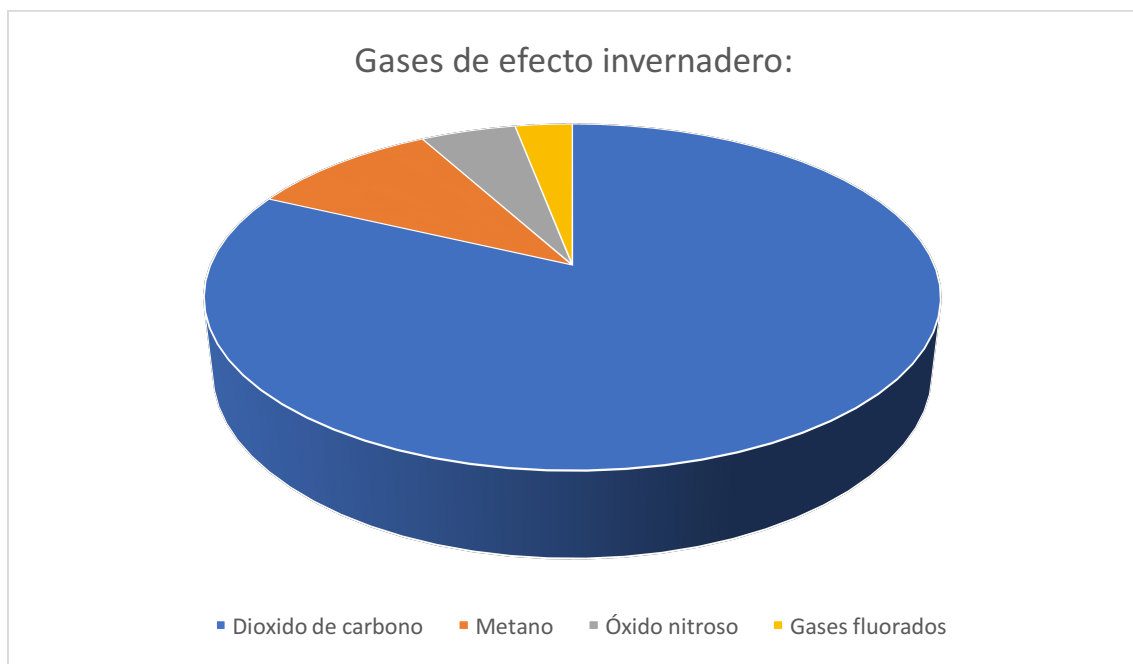


Figura 1.1. Proporción de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Como hemos comentado al inicio, el aumento de la población es uno de los principales orígenes de que exista este cambio climático. Esto supone una ampliación desmedida del consumo y un desperdicio de los alimentos, lo que provoca un incremento de dicho desperdicio en los vertederos. Este problema, no es solo económico dado que el medio donde se tira esta materia es una de las principales afectadas.



2. DESPERDICIO ALIMENTARIO

Debido al estilo de vida que llevamos, nos enfrentamos a un desafío del consumo. Cada año se desecha un tercio de la comida producida en todo el mundo (1,3 billones de toneladas) [1]. Este desperdicio ocurre normalmente en etapas iniciales. Nos referimos a desperdicio a los alimentos que, de forma intencionada, son excluidos por los consumidores. Y pueden llegar al 54% desde que se producen, manipulan y se almacenan [2].

En las viviendas familiares se producen muchos residuos de descomposición heterogénea, muchos de origen vegetal o animal. Estos residuos orgánicos suelen ser sobrantes de comida (como peladuras), alimentos en mal estado o excesos de platos no consumidos. Cada uno de los 46 millones de españoles generamos unos residuos totales aproximados de 450 kg de los cuales el 60% irán al vertedero más cercano. Los vertederos son la forma más común de tratar los residuos y se pueden dividir en tres categorías principales: los que contienen residuos no peligrosos, los que contienen residuos peligrosos y los inertes.

La realidad es que el vertedero es la opción menos recomendable por el impacto que genera en el medio ambiente. Esto hace que muchos se impermeabilicen para que no lleguen a su entorno productos contaminantes. En España los residuos que se desechan en los vertederos presentan un alto contenido en materia orgánica y por consecuencia de su putrefacción hace fermentar estos residuos que generan gases nocivos para todo nuestro entorno. En su mayoría estos gases son el famoso metano. El metano es uno de los gases, que, junto con el dióxido de carbono, provocan el inevitable efecto invernadero. Este fenómeno retiene parte de la energía que debería dispersarse de forma natural y que siendo calentada por la radiación solar provoca un aumento de la temperatura terrestre. [10]



Estudio técnico sobre aplicabilidad de la
tecnología de digestión anaerobia seca
para la conversión de residuos de alimentos
en biogás.



Esta materia orgánica es un problema a nivel mundial por: las enormes cantidades generadas y el potencial contaminante cuando se biodegrada en el terreno.

Los residuos alimentarios tienen una serie de características que promueven una buena recuperación de los nutrientes, estas propiedades son unas altas: biodegradabilidad, contenido en materia seca y relación de sólidos volátiles con sólidos totales. Otra de sus particularidades es su potencial bioquímico de metano (BMP), la baja presencia de metales pesados y unas proporciones variables de nutrientes y micronutrientes. [3], [4] Debido a estas singularidades la combustión no es una tecnología adecuada, tampoco la gasificación. La formación de gas y ceniza se incrementaría en el medio y a nivel económico no es rentable, a largo plazo, por su alto coste de operación, por eso debemos buscar otro tipo de vía para deshacernos de estos desechos. [5], [8]

Una de las soluciones que propone este estudio para el aprovechamiento de los residuos alimentarios es su conversión en biogás mediante la digestión anaerobia, y más concretamente mediante la digestión anaerobia por vía seca. Esto proporcionará un tratamiento para el manejo de residuos alimentarios y se podría considerar una de las mejores opciones para esta problemática. [6], [7]



3. BIOGAS

El gas combustible compuesto principalmente por metano (50-70%), dióxido de carbono (20-45%) y otros gases en menor proporción como pueden ser el vapor de agua o aire, a estos últimos se les considera impurezas, y todo su conjunto es lo que llamaremos biogás. Su composición dependerá de la fuente de materia orgánica de la que se origina. Una de las procedencias de este gas es la fracción orgánica de residuos, aunque también se puede sacar de agroindustrias. El principal componente del biogás es el metano, su baja densidad hace que sea más ligero y por ello este gas se presenta siempre a cota cero. Esto rebaja los posibles riesgos que supone sufrir una explosión. Uno de los problemas del metano, no es solo su propiedad inflamable, sino que es uno de los gases que genera hasta 21 veces más que el dióxido de carbono el efecto invernadero, que con anterioridad hemos explicado. Al tratar el gas evitaremos que acabe en la atmósfera y por lo tanto evitaremos que este fenómeno siga aumentando sin medida. Por lo tanto, podremos afirmar que el biogás ayudará a disminuir la huella de emisiones humanas que estamos generando. [9]

Tabla 3.1. Porcentaje de composición de los compuestos del biogás.

COMPUESTOS DEL BIOGÁS: (%)	
Metano, CH_4 .	50-70%
Dióxido de carbono, CO_2	20-45%
Vapor de agua, H_2O	1-2%
Monóxido de carbono, CO	0-0,3%
Nitrógeno, N_2	1-5%
Hidrógeno, H_2	0-3%
Sulfuro de hidrógeno, H_2S	0,1-0,5%



Estudio técnico sobre aplicabilidad de la tecnología de digestión anaerobia seca para la conversión de residuos de alimentos en biogás.



El biogás es una energía secundaria debido a su alto aporte calorífico puede generar calor y electricidad en fuentes especializadas para ello. Este gas se genera mediante la fermentación anaeróbica y copia de forma natural el ciclo de descomposición biológica del mismo. Este proceso sucede en vertederos y reactores cerrados llamados digestores anaerobios. Los digestores anaerobios se alimentan de materia orgánica también llamada sustrato. [11]

Uno de los beneficios del biogás es que es considerado una energía renovable, fortaleciendo su carácter a la hora de restaurar los procesos naturales a una velocidad que se ve claramente incrementada a la del consumo que genera el hombre. Esta energía procede de fuentes duraderas como la fermentación anaeróbica de productos de materia orgánica. Uno de los principales sectores generadores de compuestos orgánicos es el sector de la agroindustria. [12]



4. INTRODUCCIÓN A LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Una de las soluciones que se proponen en este estudio para aplacar las emisiones de efecto invernadero es la digestión anaerobia. Siendo el biogás considerado como una energía renovable este también se considera como un combustible neutral para el clima. [13]

Un combustible neutral se caracteriza por tener un balance cero en CO_2 . Esto se debe a que evita las emisiones por la fermentación y mantiene los mismos beneficios para obtener una mejor calidad en la atmósfera.

El proceso biológico con ausencia de oxígeno en las que intervienen diferentes poblaciones de microorganismos se denomina digestión anaerobia. Esta hace posible la transformación en fracciones orgánicas de los residuos para convertirlos en diferentes gases. Como ya hemos mencionado en anteriores páginas al explicar que productos finales se obtienen del biogás, lo que proporciona este tratamiento es una mezcla de gases en los que encontramos en su mayoría metano y dióxido de carbono, aunque, además, hallaremos nuevos microorganismos y una disolución de materia orgánica degradada.

El resultado de las reacciones bioquímicas de diversos grupos, tanto estrictas como facultativas, es la degradación de los residuos orgánicos. Esto puede transcurrir en paralelo o de forma contigua, lo que implica una población bacteriana bastante variada.

Hay dos formas de llevar a cabo este proceso según los contenidos de sólidos totales, mediante la digestión anaerobia húmeda (es la más común) y la digestión anaerobia seca.



Estudio técnico sobre aplicabilidad de la
tecnología de digestión anaerobia seca
para la conversión de residuos de alimentos
en biogás.



-En procesos húmedos: Los sólidos totales no superan el 15%. Siendo más comunes este tipo de digestiones, se aplican mucho más en el ámbito práctico, debido a que el crecimiento de los microorganismos se promueve por el elevado contenido en humedad. Aunque, esto sea un punto a favor en este tipo de procesos la realidad es que al ser un proceso más húmedo se necesita un mayor volumen en el reactor, un alto contenido en agua y un tratamiento posterior muy costoso. [8]

-En procesos secos: Los sólidos totales se encuentran entre un mínimo del 15% y un máximo del 40%. Nos centraremos más en este siendo un proceso muy novedoso aún. Sus múltiples provechos son un reducido capital y bajos costos operativos, entre ellos. Pero, también tiene sus contras como una alta demanda de inóculo, un tiempo de retención alto y acumulación de ácidos grasos volátiles. [14]

A continuación, en la tabla 4.1, se puede apreciar de una manera más intuitiva las diferencias en los distintos procesos: vía húmeda y vía seca, para el tratamiento de los residuos de materia orgánica.



Tabla 4.1. Comparación de procesos por vía húmeda y vía seca. [11]

Criterios	Digestión vía húmeda	Digestión vía seca
Entrada de material	Máximo 20% en materia seca.	Entre 20-40% en materia seca.
Consumo de agua	Puede ser necesaria la dilución.	Puede haber renovación del agua percolada.
Estabilidad del proceso	Fácil intervención en caso de desequilibrio biológico.	Necesidad de gestionar varios digestores a la vez.
Calor necesario	Del 20-30% del calor producido.	Menor necesidad para instalaciones térmicamente aisladas.
Energía necesaria	Bombas y mezcladores.	Baja.
Digestato	Bombeado.	Extraído con cargador de digestato.
Mano de obra necesaria	Posible automatización del proceso.	Necesaria para cargar y descargar.
Producción de biogás	Producción continua	Producción discontinua
Seguridad	Puesta en marcha de la planta con periodo de alto riesgo.	Carga y descarga de los reactores con periodo de alto riesgo.



5. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Para comprender un poco más la digestión anaerobia y cómo funciona explicaremos las etapas. Estas etapas se diferencian en cómo se va degradando el sustrato y da lugar a procesos químicos los cuales nos darán el gas deseado. Los microorganismos que ejecutan este proceso son los acidogénicas, acetogénicas y metanogénica, estas bacterias son responsables de que la digestión a partir del sustrato se convierta en metano. La materia orgánica que utilizaremos para que funcionen los reactores se encuentra en forma de carbohidrato, aceites, grasas y proteínas, esto son los llamados polímeros. Los polímeros tienen un gran tamaño y las bacterias no son capaces de atravesar la pared celular, por ello hay que dividir en cuatro etapas el procedimiento de digestión anaerobia. [15]

Hay que tener en cuenta que en cada uno de estos periodos son utilizados diferentes tipos de microorganismos, que necesitarán de condiciones especiales para que se dé su entorno propicio. Si no se produce una digestión estable daría lugar a un mal rendimiento y a una acumulación de compuestos intermedios en cada una de las siguientes etapas.

Las etapas son las siguientes, resumidas muy brevemente: [16]

- Hidrólisis: consta en la conversión de biopolímeros no solubles a compuestos orgánicos solubles.
- Acidogénesis: conversión de compuestos orgánicos solubles a ácidos grasos volátiles y dióxido de carbono.
- Acetogénesis: conversión de ácidos grasos volátiles a acetato e hidrógeno.
- Metanogénesis: Conversión de acetato, dióxido de carbono e hidrógeno en metano.

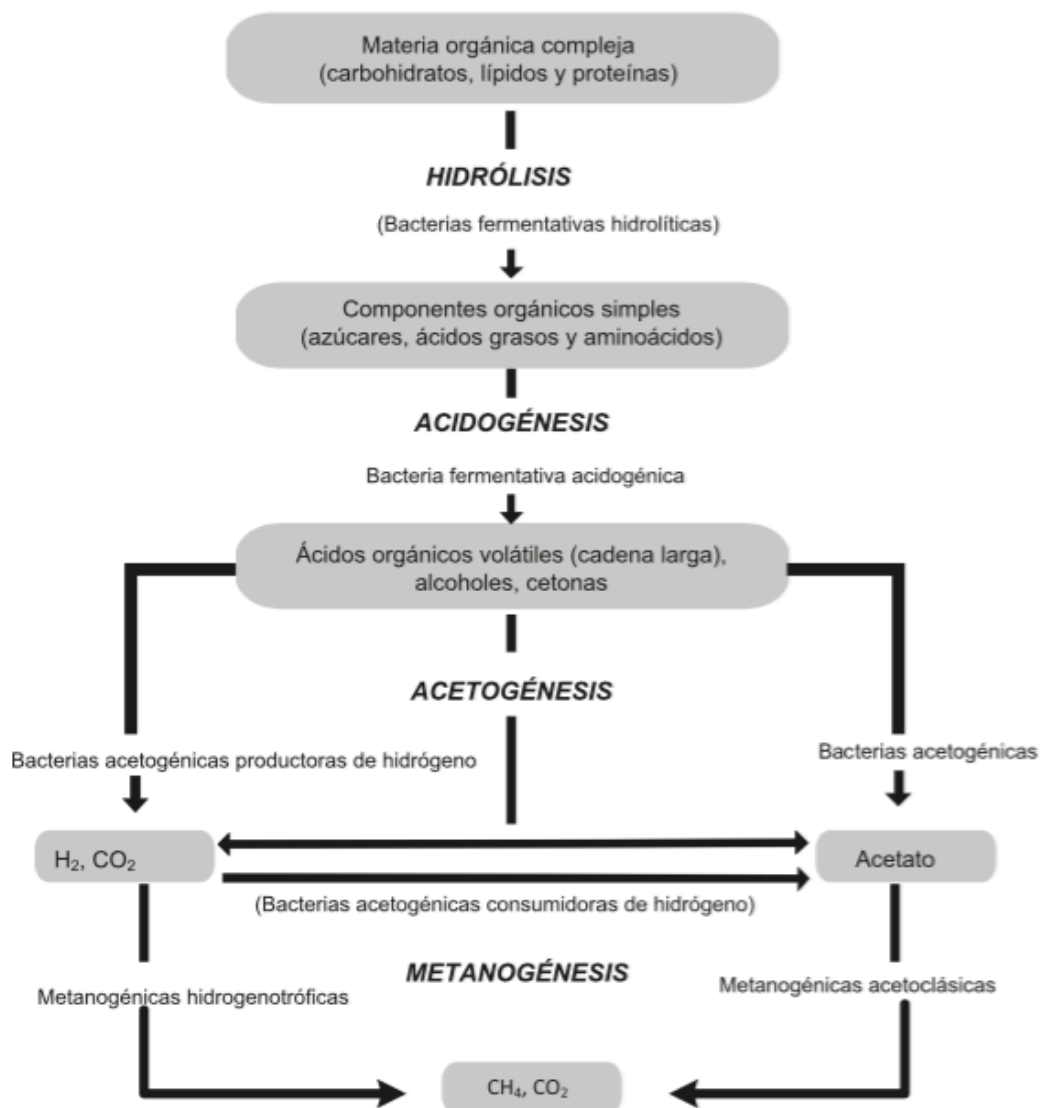


Figura 5.1. Esquema de digestión anaerobia en materia orgánica compleja. [35]

El gas metano es producido por las siguientes sustancias simples:

- Ácido acético.
- Etanol.
- Metanol.
- CO_2 .
- Hidrógeno.



6. PARAMETROS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Como la digestión anaerobia es un proceso muy sensible a los cambios por la creación del metano, para que su rendimiento sea óptimo y tengamos una alta producción de este gas, se tienen que dar los siguientes parámetros.

6.1. Temperatura

La temperatura es un parámetro esencial a la hora de definir la operación del proceso puesto que determina la labor que tendrán las bacterias en el interior del digestor. La estabilidad de la digestión dependerá totalmente de esta, ya que el rendimiento del biogás está muy ligado a este parámetro junto con el tiempo de retención.

Podemos definir tres rangos de temperaturas: [18]

-Psicrofílico: Son las temperaturas que se encuentran por debajo de los 35°C. Su rendimiento óptimo está comprendido entre los 15-18 °C. Aunque por debajo de los 15°C obtenemos un rendimiento demasiado bajo.

-Mesofílico: Son las temperaturas que se encuentran entre los 29 y 40°C. Su rendimiento óptimo está comprendido entre los 33-38°C.

-Termofílico: Son las temperaturas que se encuentran entre los 40 y 65°C, siendo su rendimiento óptimo de 55-60°C. Siendo desfavorable para el digestor las temperaturas superiores al 65°C.

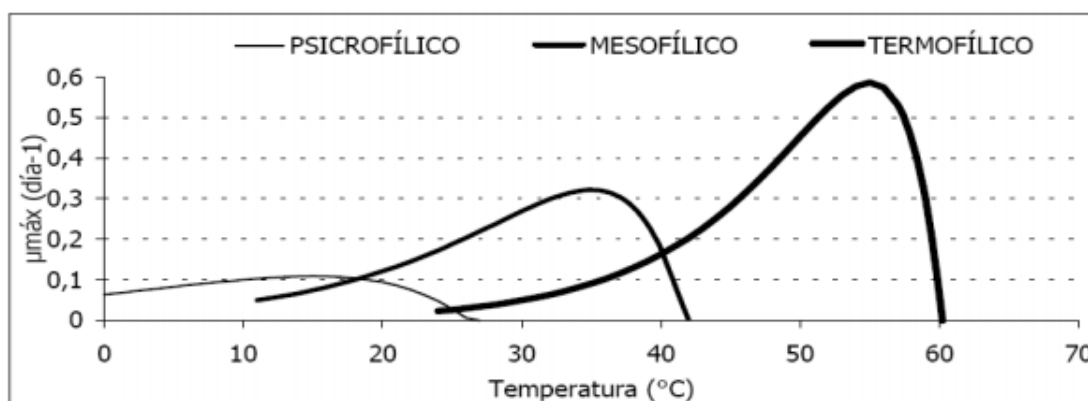


Figura 6.1. Relación entre la velocidad específica máxima de crecimiento y la temperatura en los distintos rangos de temperatura. [18]

Las temperaturas termofílicas proporcionan más ventajas comparadas con las demás temperaturas. Entre ellas, una mayor cantidad de metano, debido a que convierten los ácidos orgánicos más rápidamente por la alta tasa de crecimiento de las bacterias. Esto conlleva a menores tiempos de retención, lo que da como resultado un proceso más rápido y más eficiente. Además, otorga un sustrato de alta calidad y libre de patógenos que sirve como abono para el suelo. [15]

Este proceso también tiene algunas desventajas, al trabajar con temperaturas altas hay un mayor grado de desequilibrio, y un riesgo alto en la inhibición del amoníaco. El amoníaco tiene una toxicidad alta si las temperaturas de operación lo son, esto puede reducirse al disminuir la temperatura fácilmente. Nos encontramos también con una alta demanda de energía ocasionada por tener una elevada temperatura. [19]

6.2. Tipo de sustrato

La producción de biogás depende proporcionalmente de la cantidad de materia orgánica que se introduzca en el reactor, esto quiere decir que si lo alimentamos más de lo cuantificado reduciremos la producción de gas por unidad de tiempo. [19]



Para saber cuánta carga de sustrato hay que meter en el reactor, se puede seguir una sencilla fórmula que se encuentra a continuación:

$$OLR = m \cdot c / V$$

Siendo:

OLR= Velocidad de Carga Orgánica ($\text{Kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)

m= Masa del sustrato por unidad de tiempo (Kg/d)

c= Concentración de materia orgánica (%)

V= volumen del digestor (m^3)

En los ensayos, a la hora de elegir el tamaño, tipo de reactor o el tiempo de retención hay que tener en cuenta el rendimiento de biogás y tener una economía vegetal que justifique este rendimiento. [12] [17]

6.3. Nivel de PH

Este parámetro afecta a la velocidad del proceso y determina los tipos de organismos que pueden darse en el mismo, por eso en muchas investigaciones han optimizado el valor del PH para cada estado, dado que muchas bacterias son influidas por estas concentraciones ácidas y no crecen adecuadamente. Los niveles de PH de los reactores trabajan mejor cercanos a la neutralidad. [15]

Tenemos que tener en cuenta que los ácidos grasos bajan el nivel del PH y, por el contrario, la presencia de amoníaco puede incrementar este valor. Por este motivo, este parámetro no se recomienda para monitorear. [17]

**Tabla 6.1.** Intervalo de PH óptimo en la digestión anaerobia.

ETAPA	INTERVALO OPTIMO DE PH
Hidrolítica	7,2-7,4
Acidogénica	6,0
Acetogénica	7,0-7,2
Metanogénica	6,5-7,5

6.4. Tiempo de retención

El tiempo de retención es el intervalo que pasa el sustrato dentro del tanque. El volumen de digester es proporcional al volumen diario de carga, por lo que este parámetro nos ayudará a la hora de dimensionar el tanque de biogás. Conociendo un tiempo de retención estimado, el volumen de entrada de materia prima y la velocidad a la que se degrada el sustrato, es posible estimar el volumen del digester. Para ello podemos guiarnos de la fórmula que tenemos a continuación:

$$TRH = \frac{\text{Volumen del digester}}{\text{Volumen diario de carga}}$$

Tenemos que tener en cuenta que en tiempos cortos se proporciona una buena velocidad de flujo, aunque no se podrán reproducir las bacterias a la cota que buscamos para que el nivel de gas sea óptimo. Por lo que examinaremos un punto medio, para adaptar la velocidad del flujo con la duración del proceso de digestión anaerobia.

Dependiendo del material orgánico que introduzcamos obtendremos mayores o menores tiempos de retención. Por ejemplo, los residuos que contengan un alto contenido en carbono demandarán una retención mucho mayor. Si tenemos una tasa de degradación baja el periodo bajará. [17], [19]



El tiempo de retención es sensible a la temperatura y el tipo de degradación que tenga la materia prima que introduzcamos en los reactores. Esto quiere decir, que en temperaturas mesofílicas puede variar entre 30-60 días y en temperaturas termofílicas bajamos el número de días a 10-16 días. [18]

6.5. Relación C/N

Este parámetro relaciona el nivel de carbono que hay en el reactor con la cantidad de nitrógeno. El valor óptimo para este enlace varía dependiendo del material orgánico que se introduzca. Pero diversos estudios afirman que no debe de ser un valor desproporcionado y debe rondar entre los 20-30 C/N. [15]

En caso de que la relación sea muy alta se produciría un consumo de nitrógeno elevado y se vería resentida la producción de biogás, por el contrario, si la relación es baja desencadenaría una producción alta de amoníaco y se incrementaría el PH lo que supondría una colonia de bacterias que descenderían estrepitosamente.

6.6. Concentración de nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal es necesario para el proceso porque ayuda al crecimiento microbiano dentro del reactor. Tenemos que tener cuidado porque un exceso de amoníaco, especialmente el amoníaco libre, aumentaría el PH y esto inhibiría a las bacterias que se encuentran en el mismo, lo que supondría una bajada del nivel de gas metano. [19]

$$NH_3 = \frac{T - NH_3}{1 + \frac{H^+}{Ka}}$$



Esta ecuación ayuda a determinar la concentración del amoníaco libre. Esta es directamente proporcional a la temperatura, por lo que a temperaturas termofílicas quedará notablemente más reducido que a temperaturas mesofílicas. [17]

6.7. Rendimiento de metano

Todos los parámetros mencionados en este apartado son necesarios para obtener un óptimo aprovechamiento en el proceso de digestión anaerobia seca. Una vez que se tienen todos estos parámetros bien definidos y ajustados en cada etapa se puede empezar a diseñar todo el sistema. El rendimiento del metano es un claro indicador de que todo el procedimiento funciona de una manera correcta, puesto que si hay una buena cantidad de gas metano entonces todo el diseño del reactor es rentable. [15]



7. TIPOS DE TECNOLOGÍAS EN DIGESTIÓN ANAEROBIA

Tenemos diferentes formas de categorizar las tecnologías de digestión anaerobia, ésta dependerá de los diferentes procesos a los que esta sea sometida. Siendo clasificada dependiendo de su función, ya sea por sólidos totales, mediante la alimentación del digestor, las etapas a las que se llevará acabo o por la materia prima por la que será alimentado.

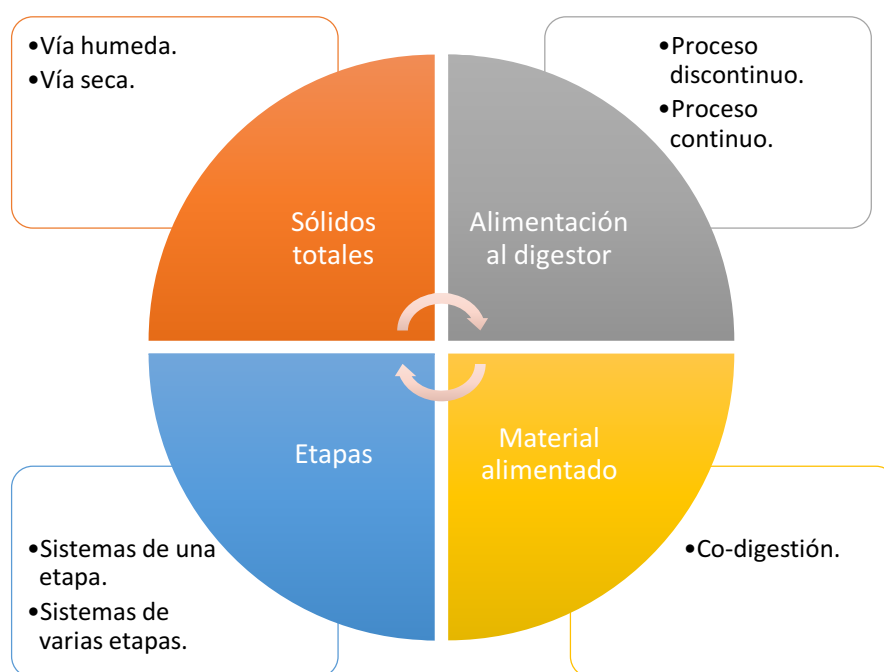


Figura 7.1. Clasificación de la tecnología de la digestión anaerobia.

La clasificación por sólidos totales es la más extendida de todas, tenemos de dos clases: por vía seca y por vía húmeda. Ambas están explicadas de forma extendida en apartados anteriores. Por resumir mucho, el proceso en vía seca es aquel que emplea un contenido en sólidos totales de entre 20-40%. Y el proceso en vía húmeda es aquel que no supera el 15% de los sólidos totales.

La alimentación al digestor se puede llevar a cabo mediante un proceso continuo o discontinuo. En el proceso por continuo, como bien dice la palabra, el reactor el



alimentado en todo momento, al mismo tiempo que se descarga. En cambio, el proceso discontinuo, una vez que empieza la digestión no se puede abrir el reactor hasta que termine y poder ser vaciado y rellenado nuevamente de la materia prima.

Las etapas o pasos de los digestores pueden ser de una o múltiples etapas. Cuando solo ocurre una etapa las fases de la digestión ocurren enteramente en el reactor. Por el contrario, cuando se tienen varias etapas, la digestión se lleva a cabo de diferentes reactores.

Por último, el material del que se alimenta el reactor es por co-digestión. Esta co-digestión funciona al mezclar la materia prima que se va a introducir en el reactor con un sustrato que hace que mejore todo el proceso. Esto es debido a que la relación C/N es mejorada con este tipo de percolado y en consecuencia mejora la creación de biogás.

Dentro de la digestión anaerobia la que nos interesa en nuestro estudio es el proceso por vía seca, a su vez en esta clasificación podemos subclasificarla en diferentes categorías, como puede verse en el gráfico mostrado a continuación: [15]

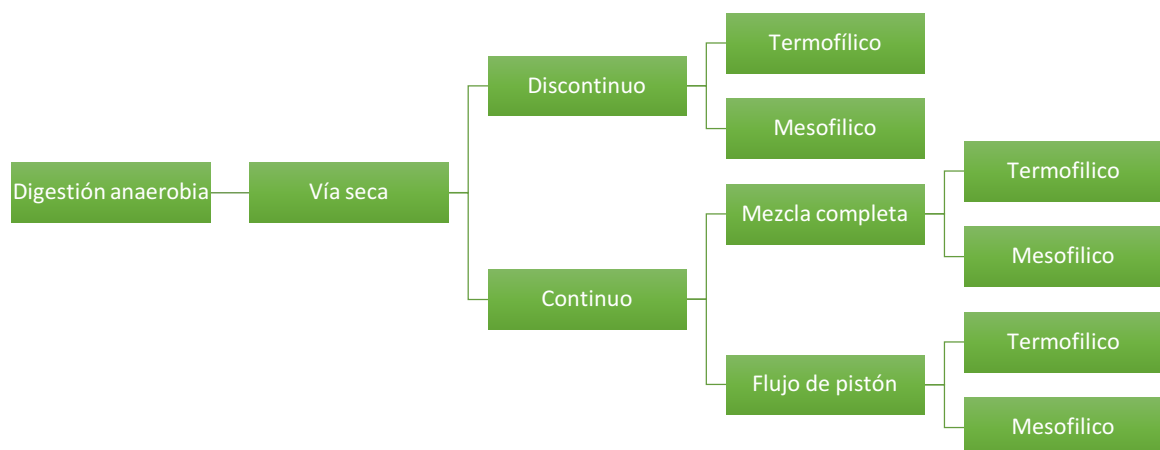


Figura 7.2. Tecnología de la digestión anaerobia por vía seca.



8. DIGESTIÓN ANAEROBIA SECA

Una vez definido el proceso de la digestión anaerobia en profundidad, podemos centrarnos en el proceso en seco. Como hemos definido al principio, este tipo de digestión admite unos sólidos totales superiores al 15%.

Centrándonos en las ventajas que presenta la fermentación por vía seca encontramos que nos permite aplicar grandes cargas de materia orgánica, esto supone un menor uso de agua y por consiguiente un menor volumen en los reactores, lo que hace que requiera un uso reducido del espacio. Ya solo con esto, los costes de inversión se reducen, también los costes de operación se verán reducidos porque van asociados a la gestión de los lodos que también serán menores en este tipo de digestión. Asimismo, encontramos una facilitación de sustratos de alto contenido sólido lo que lo hace un proceso mucho más flexible, puede ser aplicado tanto a grandes escalas como en pequeñas escalas. La construcción de los reactores también es sencilla, por lo que generará calor y electricidad de manera eficaz y descentralizada. Además, el subproducto que queda en forma de lodos puede ser utilizado como fertilizante, humus o abono [15]. Seguidamente podemos observar en más profundidad un esquema con sus partes:

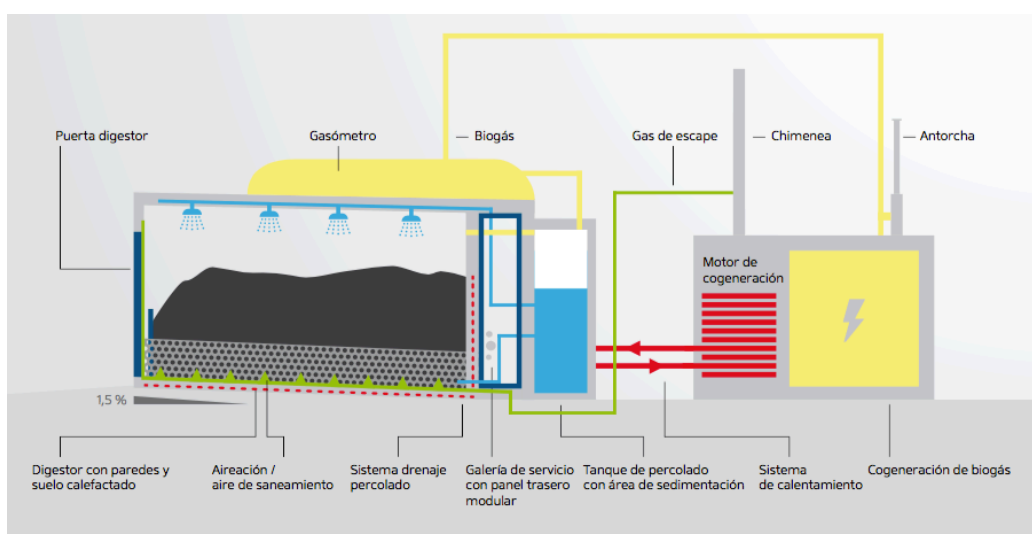


Figura 8.1. Partes de una planta de digestión anaerobia seca. [20]



Aunque la digestión anaerobia seca tenga numerosas ventajas, también encontramos alguna que otra desventaja, como pueden ser la sensibilidad que tiene todo el proceso a factores como temperatura, PH, etc. Es propensa a choques tóxicos por ser un tratamiento que requiere de tiempos elevados de contacto. Otro factor negativo es que tenemos que ser conocedores de las características específicas del material como la materia biodegradable, el porcentaje de sólidos totales y volátiles. [18]

En la imagen 3D que tenemos seguidamente, podemos apreciar las siguientes partes: [20]

- 1) Digestores.
- 2) Gasómetro.
- 3) Contenedor de equipos técnicos y de control.
- 4) Tanque de percolado.
- 5) Motor de cogeneración.
- 6) Almacenamiento del material de entrada.
- 7) Biofiltro.

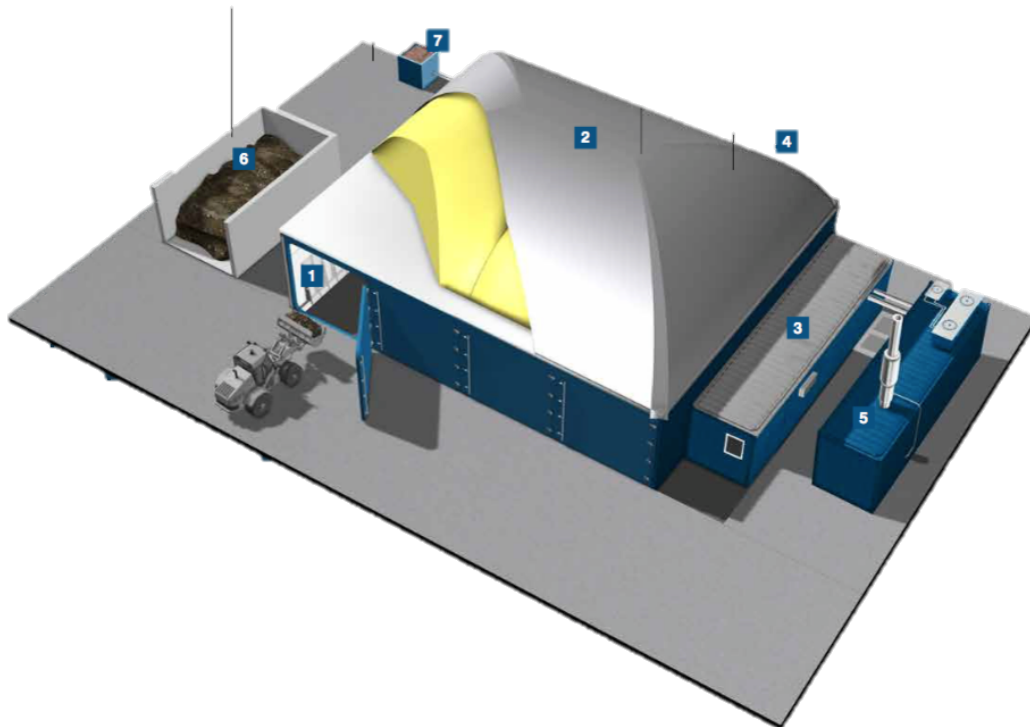


Figura 8.2. Imagen en 3D de una planta de digestión anaerobia por vía seca. [20]



9. SUPUESTO PRACTICO

9.1. Datos de partida

Con las referencias que disponemos del proyecto que realizaron los investigadores Amaya Lobo García y Carlos Rico de la Hera sobre la “producción de biogás a partir de residuos: tecnologías y estrategias de gestión”, financiado por SODERCAN, analizaremos los primeros datos de partida para la aplicabilidad de la tecnología de digestión anaerobia por medio seco para la conversión de residuos alimentos orgánicos en biogás. [21]

En Cantabria en el año 2015 se recogieron solo de residuos domésticos 290.000 toneladas de las cuales más del 75% pertenecían a la fracción resto, que son las que van a parar al contenedor verde [12]. Este proyecto analizó la problemática de los biorresiduos y dio como solución los procesos por digestión anaerobia seca, concretamente en reactores de tipo garaje, que son las más comunes en Europa hasta la fecha y se han probado y construido muchas plantas en Alemania. Se llama de tipo garaje por la similitud que tienen estos reactores con los garajes individuales.

En este supuesto práctico se utilizará la tecnología de digestión anaerobia seca por lotes con recirculación de una fase líquida, esto significa que habrá que cargar y descargar los reactores teniendo en cuenta que no hay que fragmentar la producción de biogás, por lo que habrá que secuenciarlo cuidadosamente.

9.2. Diseño y construcción

Antes de meternos en temas técnicos sobre cómo funciona este proceso vamos a explicar la optimización de los reactores junto con su diseño. Para la construcción de los reactores a una escala mucho más pequeña que la habitual (tipo laboratorio) se contactó con un taller que construyo, con la ayuda de los planos previamente diseñados, los reactores. La construcción de estos tanques se diseñó de tan forma que,



si uno de ellos necesitase cantidades de inóculo o materia prima diferentes, se podrían probar con proporciones completamente variables. Los reactores tienen dos compartimentos, en uno de ellos es donde se coloca la materia prima y en el otro es dónde se almacena el percolado y se acumula el inóculo. El material del que se han construido los reactores es acero inoxidable 304.



Figura 9.1. Digestores tipo garaje fabricados en el taller.

Los compartimentos donde se almacenan los residuos de materia prima disponen de las siguientes medidas: 25 cm x 50 cm x 25 cm. Con una capacidad de 31,2 L de los cuales 21 L se dispondrán de forma útil. Disponen de una pequeña pendiente de 1,5% que ayudará al desagüe del percolado. Además, dispondremos de un soporte con ranuras para soportar todo el material alimentario y que el percolado pueda traspasar el material sin dificultad.



El compartimento donde se almacena el percolado y se acumula el inóculo tiene las siguientes dimensiones: 25 cm x 25 cm x 23,5 cm. Al contrario que el compartimento donde se almacena la materia prima, éste tiene un fondo de forma cónica y un volumen total de 16L de los cuales útiles son 12 L.

Para que la instalación pueda llevarse a cabo sin problemas se requiere de:

- Sistema de calefacción: los parámetros de temperatura explicados anteriormente se llevarán a cabo mediante la regulación de la temperatura para que sea posible la digestión anaerobia.
- Sistema de aspersores: el reactor poseerá tres tubos perforados en paralelo que rociarán el percolado hacía la materia orgánica.
- Conexiones de tuberías: para la conexión entre los diferentes compartimentos.
- Línea de biogás: tiene un sistema de medición del volumen. Este se recogerá en bolsas de gas, que irán conectadas a un dispositivo con sistema de desplazamiento líquido, que permite el monitoreo de los dos reactores por separado.
- Bombas de recirculación: muy importantes para que exista el movimiento del percolado. Esta bomba es la que consigue los ciclos de 1 min de 2 L de percolado.
- Mantas térmicas: colocadas en el exterior, éstas deberán de ser a la medida del perímetro del reactor. Sirven para dar calor a los digestores teniéndolos a una temperatura estable de 36-38°C medido con un termostato.

9.3. Cultivo del inóculo

El proceso dependerá de: la calidad que tengamos en el inóculo, la relación de inóculo y sustrato, y la tasa de recirculación que elijamos para el percolado. Debido a que es un proceso muy novedoso no tenemos datos de partida que sirvan como referencia. La escasa información que hay sobre cómo se debe almacenar el inóculo, o las condiciones que debe tener para su maduración, la relación del inóculo y el sustrato o de cuantos ciclos debe de ser la recirculación del percolado son uno de esos hechos que desconocemos de momento y que en este estudio se probarán varias estrategias de



recirculación con las que conseguiremos obtener la mejor calidad y cantidad de biogás para que el proceso sea lo más rentable posible. [21]

Para la puesta en funcionamiento se necesita un inóculo que, en nuestro caso, se obtendrá del purín de la vaca. Este purín se irá acrecentando con materia orgánica para alimentarlo y que sea más líquido. Se podría usar un inóculo sólido, pero se ha comprobado que conduce a una pérdida en la capacidad del volumen del reactor. El inóculo líquido hace que todo el proceso sea mucho más competitivo. Aunque tanto la inoculación líquida como sólida mejora notablemente el contacto entre el sustrato y los microorganismos, y también aumenta la humedad del sustrato [8]. Para engordar el inóculo se necesita que se degrade la materia orgánica con el estiércol modelo, una vez que el estiércol está digerido se procederá a dos tratamientos consecutivos que se llevarán a cabo con la digestión anaerobia inundando los reactores de tipo garaje. Por último, el inóculo se tamizará para que no queden partículas de un tamaño superior a 1 milímetro.

La cantidad que utilicemos de inóculo dependerá de las características del sustrato [23]. Para ello hay que tener en cuenta que la relación que hay entre el inóculo y el sustrato es un parámetro importante a la hora de optimizar todo el proceso, por ello se utilizan estas pruebas a nivel de laboratorio para poder aclimatar esta técnica con el fin de obtener los mejores resultados y que así se pueda adaptar el reactor a cada tipo de sustrato.



Figura 9.2. Foto de los residuos de cafetería empleados para el crecimiento del inóculo.

Cada digestor contiene materia orgánica sacada de la cafetería de la universidad, esta abarca desde peladuras de patatas, restos de carne y pescado, diferentes tipos de fruta, hortalizas variadas, etc. Se recogió en tres veces, las dos primeras fueron para alimentar el inóculo y procesarlo en dos digestores consecutivos, la tercera ya fue para el uso y funcionamiento de los digestores. El único procedimiento que tuvieron estos desechos fue que por motivos de un volumen tuvieron que ser reducidos, es decir, se trituraron para su mejor manejo.



Figura 9.3. Inicio y final del segundo batch para la creación del inóculo.



9.4. Digestores de garaje

Contaremos dos digestores que serán cargados de, aproximadamente, 10 kg de residuos alimentarios, calentados a un rango mesofílico y de los que se utilizarán 10 litros de percolado líquido. Aquí es donde entra la estrategia de recirculación del percolado, según diferentes estudios sugirieren que un bajo índice de recirculación al principio puede resultar acertado pues evita la acidificación y evitar que aumente su PH, más tarde, se debe ir aumentando este índice a medida que se incrementa la población de bacterias metanogénicas [24], [25], [26]. Esto hará que se obtenga un buen rendimiento en todo el proceso. Hay que tener en cuenta que en este tipo de reactores la metanización, es decir, el proceso de fermentación anaerobia de los componentes orgánicos no solo ocurre en la fase sólida, también ocurre en la líquida.



Figura 9.4. Instalación completa de los digestores tipo garaje.



Al comienzo del estudio se tomaron valores de recirculación del percolado diferentes con el objetivo de comparar los resultados de los dos reactores y así poder abordar una estrategia inicial, que más adelante, viendo como avanzaba el proceso se irían modificando y perfeccionando. Estos valores preliminares son los siguientes:

-REACTOR 1: Contiene 12 litros de percolado que se distribuirán en 6 ciclos de 1 minuto cada uno, es decir, los ciclos serán de 2 litros de percolado cada 4 horas.

-REACTOR 2: Solo se hará un único ciclo de 2 litros al día.

9.5. Puesta en marcha

Una vez escogida la recirculación inicial se procederá a poner los reactores de tipo garaje en marcha. Para el procedimiento se escogió una temperatura de 37°C (rango mesofílico), debido a que el inóculo, al ser de purín de vaca, tiene una alta concentración de nitrógeno amoniacal por lo que su relación de C/N será baja, si no se corre el riesgo de que la concentración de nitrógeno produzca la inhibición de los metanógenos y pueda fallar el reactor. El inóculo se controla mediante la salida del biogás, el PH y los ácidos grasos volátiles. Para el primer reactor se usó una relación inóculo-sustrato de 0,45 L/S y para el segundo reactor 0,52 L/S. [8]

El proceso no necesita en ningún momento de piezas móviles, lo que permite un ahorro en el consumo de energía al tener que estar los residuos parados. Estos residuos tienen que ser apilables, si no fuera el caso habría que mezclarlos con paja, para que puedan mantener una buena estructura y así mantener su porosidad. Toda la materia prima se rociará con el líquido de percolado que favorecerá el contacto entre las bacterias y los biorresiduos y así se obtendrá una humedad ideal para ayudar a todo el sistema de digestión.

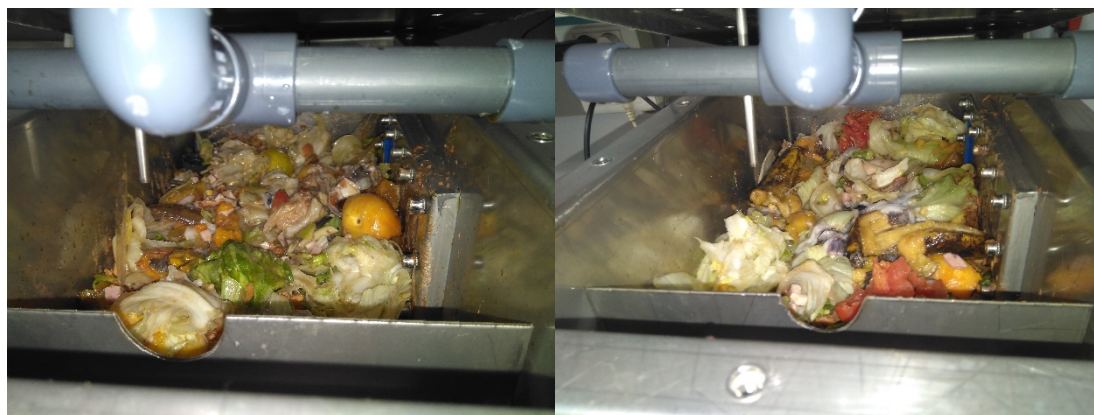


Figura 9.5. Reactores cargados con residuos al inicio del proceso.

9.6. Datos del REACTOR 1

En el primer reactor la carga del residuo en el tanque de caja es de 10,14 kg. Los primeros veinte días se utilizaron 6 ciclos diarios de 2 litros de percolado por ciclo, los restantes 12 días se utilizaron 8 ciclos diarios de 2 litros de percolado por ciclo, y los días restantes 12 ciclos diarios de 2 litros de percolado por ciclo.

Tabla 9.1. Ciclos por día del reactor 1 para la recirculación del percolado.

Ciclos de recirculación (Reactor1)	
1-20 días	6 ciclos/día x 2 L/ciclo
21-33 días	8 ciclos/día x 2 L/ciclo
33-47 días	12 ciclos/día x 2 L/ciclo

En la gráfica que se muestra a continuación, podemos observar la producción diaria de metano en los digestores de garaje. En azul se ve la producción de metano total al día, en naranja el metano que se obtiene en el tanque de percolado y en gris el metano que se obtiene en el tanque de caja, ambos diarios. A partir del quinto día podemos vislumbrar como aumenta el metano hasta llegar a su máximo volumen alcanzado que



fue el día 17 con un total de 56,3 L CH_4 / día. En esta gráfica también observamos que gran parte del metano se produce en el tanque de percolado.

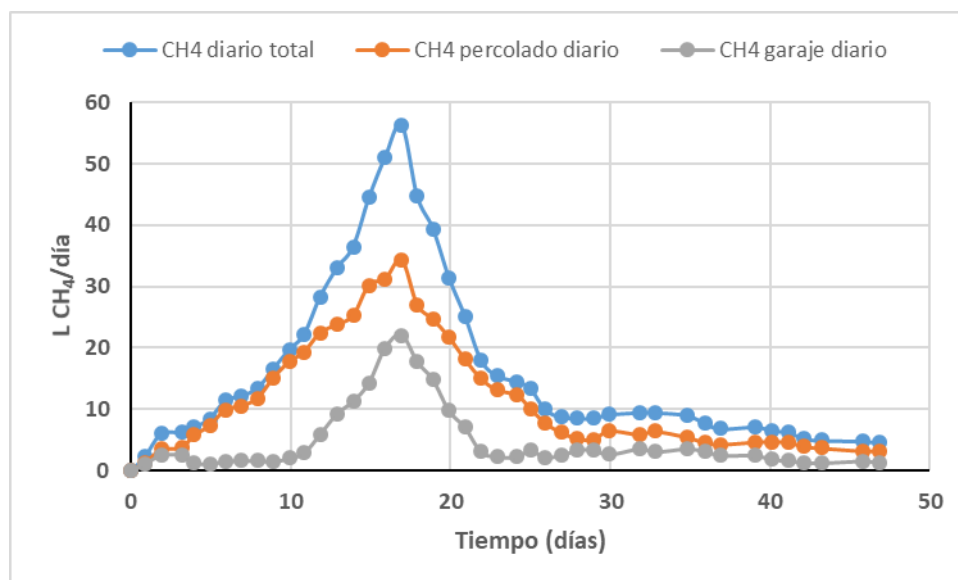


Figura 9.6. Producción diaria de metano en el reactor 1.

En la siguiente gráfica, se puede apreciar en azul el metano acumulado y en naranja la producción de biogás total acumulada. En el día 47 obtenemos un total de 73 L de CH_4 /kg y 138 L de biogás/kg.

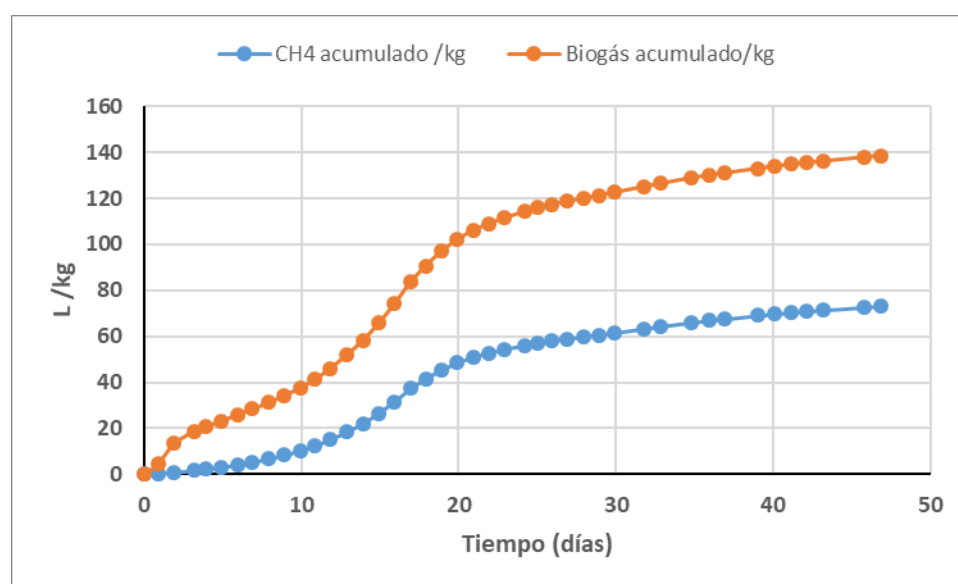


Figura 9.7. Producción acumulada de biogás y metano en el reactor 1.



A continuación, tenemos la gráfica que representa la distribución de la producción del metano. En gris obtenemos el volumen total de metano, en azul el metano acumulado en el tanque de percolado y en naranja el metano que se acumula en el tanque donde se encuentra la materia prima. Como también se ha podido ver en la primera gráfica, se aprecia que la mayor acumulación de metano se encuentra en el tanque de percolado, llegando a ser de hasta un 70%.

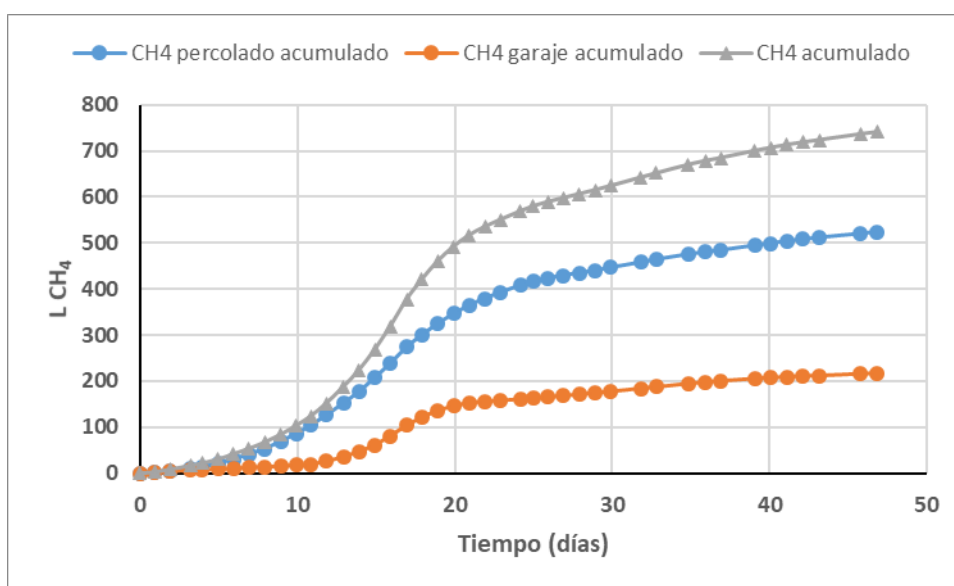


Figura 9.8. Distribución de la producción de metano en el reactor 1.

La última gráfica muestra el porcentaje de metano que se encuentra en el biogás que se ha generado en el reactor. La línea de puntos azul muestra el porcentaje de metano en seco en todo el proceso, en naranja el porcentaje de metano en seco en el tanque de percolado y el gris el porcentaje de metano en seco en el tanque caja. Prácticamente en todo el proceso se puede ver la superioridad del porcentaje obtenido en el tanque de percolado comparado con la obtenida en el tanque de caja. En los primeros días la diferencia es muy notoria llegando a alcanzar un 70% de metano, el día 15 debido a un incremento en la recirculación se puede apreciar como disminuye este porcentaje. A excepción del final del proceso, que el porcentaje de ambos tanques se iguala.

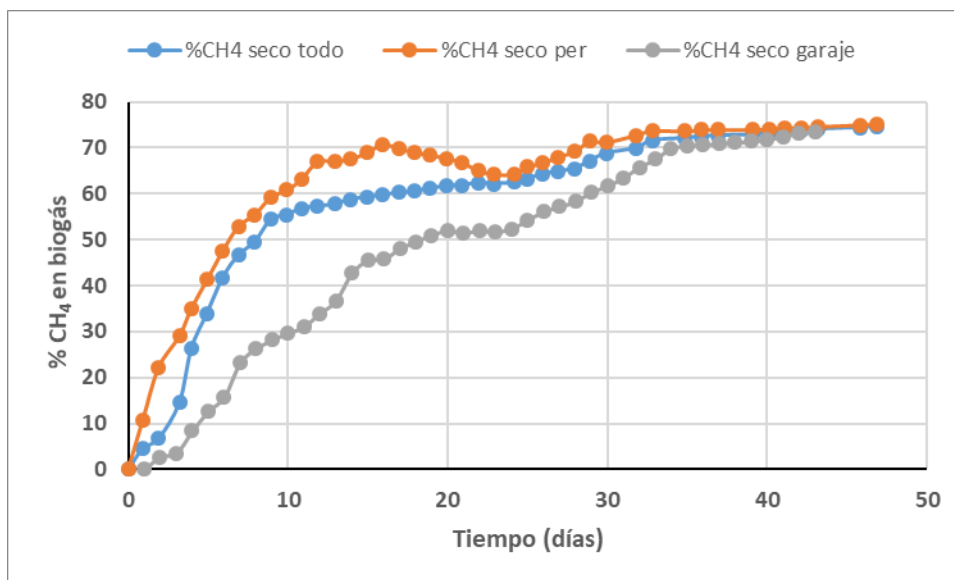


Figura 9.9. Porcentaje de metano en el biogás generado en el reactor 1.

La conclusión a la que llegamos del primer reactor, es que mientras trascurrían los primeros días en el desarrollo del proceso se pueden percibir la aparición de ácidos grasos volátiles siendo su cresta máxima el día 7 con 40 g DQO(AGV)/L. Lo que verifica que aumentar la tasa de recirculación al comienzo de este desarrollo aumenta también la actividad de la población metanogénica y la acidifica. Por el contrario, los días sucesivos a esta su incremento se vio reducido gradualmente hasta desaparecer el último día.

Al tener ácidos grasos volátiles al origen se vio un que el PH de este es mínimo siendo de 6,3 hasta el día 7, que es cuando los ácidos grasos volátiles comenzaros a descender y por consecuencia aumentó el PH hasta estabilizarse en un rango de 7,6-7,8.



9.8. Datos del REACTOR 2

Para el segundo reactor la carga de la materia prima en el taque de caja es un poco inferior a la del primero, es de 9,71 kg. Los primeros dieciséis días se dispondrá de un único ciclo diario de 2 litros de percolado, tres días después de aumentará a 4 ciclos día con 2 litros de percolado por ciclo, y los días restantes se utilizarán 16 ciclos al día de 2 litros el ciclo.

Tabla 9.2. Ciclos por día del reactor 2 para la recirculación del percolado.

Ciclos de recirculación (Reactor2)	
1-16 días	1 ciclo/día x 2 L/ciclo
17-20 días	4 ciclos/día x 2 L/ciclo
21-47 días	16 ciclos/día x 2 L/ciclo

La siguiente gráfica muestra la producción diaria de metano que, a diferencia de los datos obtenidos en el primer reactor, en este se utilizó una tasa de recirculación más baja lo que dio como resultado una mejora considerable los tres primeros días en la producción de biogás. En azul se muestra la cantidad de metano total al día, en naranja el metano que se encuentra en el tanque de percolado y en gris el metano que se encuentra en el tanque caja el tanque donde se depositan los residuos sólidos. El rango máximo que se puede analizar, viendo la línea de puntos azules, se distingue que sucede en el día 11 con una producción de 30,5 L CH_4 /día, un pico considerablemente más bajo que el que pudimos conseguir en el primer reactor. A partir de este día, la producción cae en picado, por lo que el día 17 se vuelve a aumentar la tasa de recirculación, que aumenta hasta su máximo el día 23 con una producción de 25 L CH_4 /día.

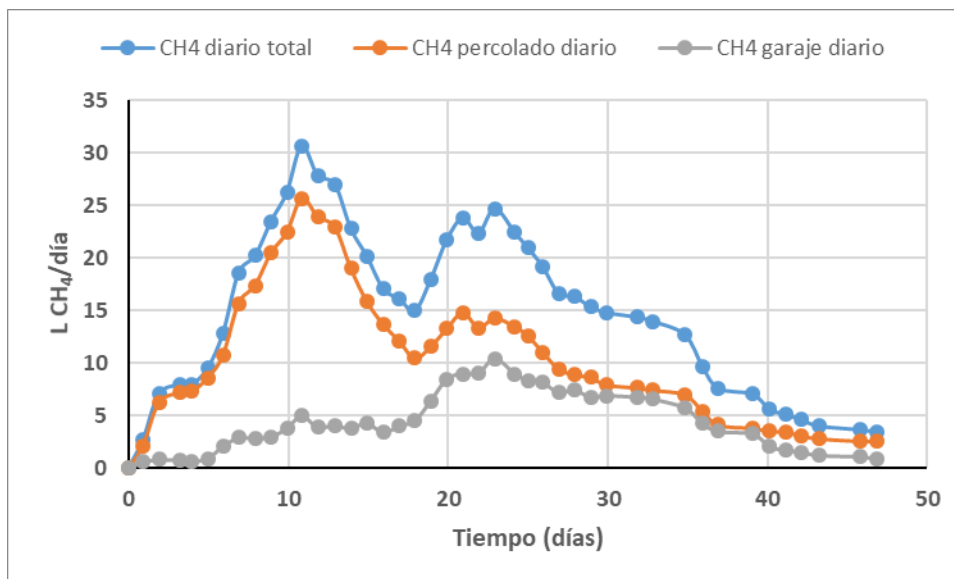


Figura 9.10. Producción diaria de metano en el reactor 2.

En la gráfica de producción acumulada mostrada a continuación se puede observar en la línea de puntos azul el metano y en la línea de puntos naranja el biogás. Ambas contienen, comparado con el primer reactor, una proporción semejante de gas. El segundo reactor un poco menor lo que puede deberse principalmente a la composición de la materia prima que tenía en el tanque caja. En el día 47, la producción de gas metano fue de 70 L/kg y de biogás 132 L/kg.

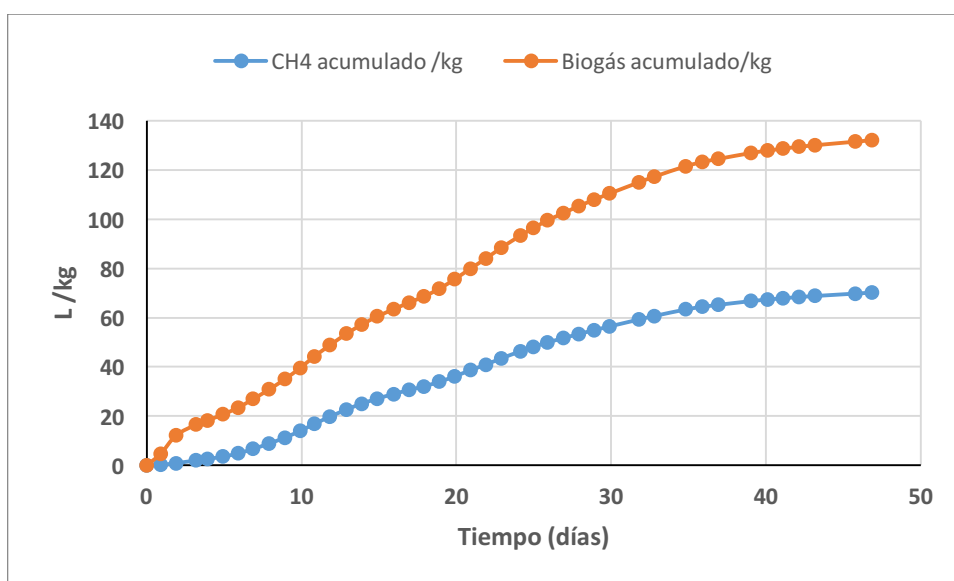


Figura 9.11. Producción acumulada de biogás y metano en el reactor 2.



La distribución de la producción de metano se puede dar en el tanque de percolado (línea azul) o en el tanque caja (línea naranja). Al igual que en el primer reactor, la mayoría del metano acumulado se da en el tanque de percolado.

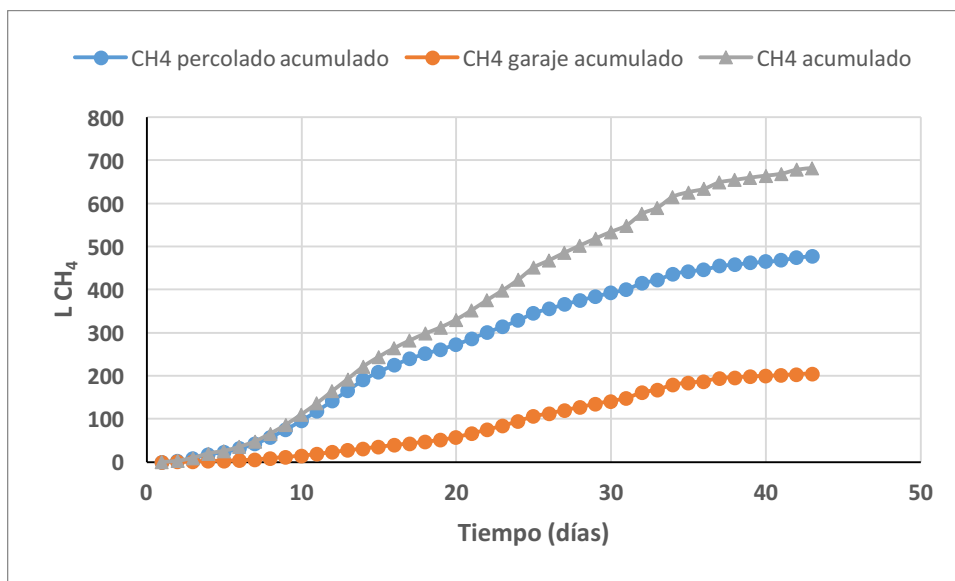


Figura 9.12. Distribución de la producción de metano en el reactor 2.

Al cambiar la tasa de recirculación del percolado se vio que la calidad del metano mejoró. Siendo en el tanque de percolado, representado por la línea de punto naranja, dónde se llegaron a porcentajes de aproximadamente un 80%. Más tarde, al volver a cambiar la tasa de recirculación se puede apreciar un descenso hasta prácticamente igualarse en el último día de operación con el tanque caja.

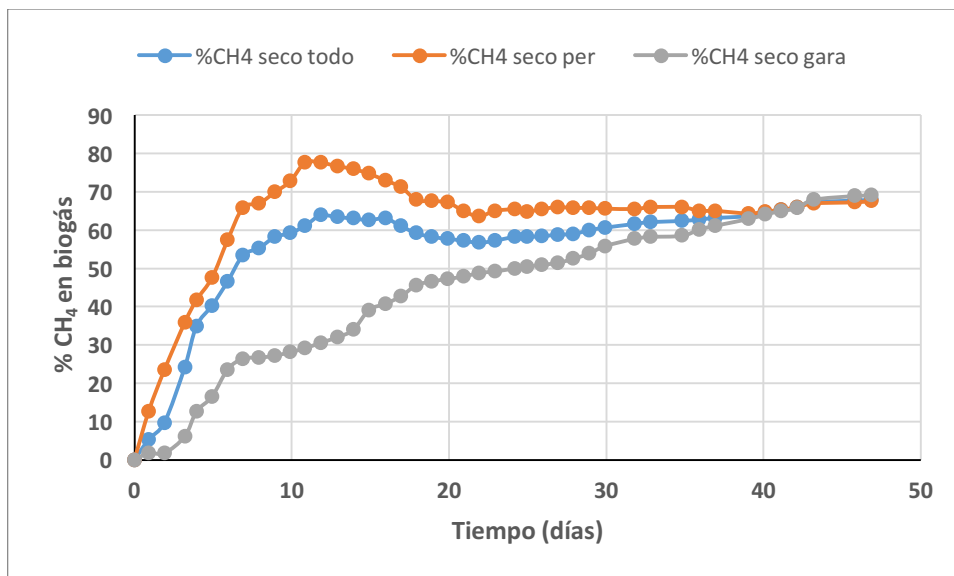


Figura 9.13. Porcentaje de metano en el biogás generado en el reactor 2.

Al contrario que en el primer reactor, se puede llegar a la conclusión de que los datos del segundo son más estables. En este segundo reactor, los primeros cinco días el PH mínimo que se alcanzó fue de 6,8 con una concentración de ácidos grasos de 29,1 DQO(AGV)/L, mucho más reducida que los 40 DQO(AGV)/L que alcanzó el primer reactor la primera semana. Por lo que podemos resaltar que aumentar progresivamente la tasa de recirculación es beneficioso para la estabilidad del proceso. Los valores del PH y los ácidos volátiles grasos son una buena forma de ir acomodando este parámetro para que cada vez sea más precisa, combinando las bajas tasas de recirculación los primeros días en el segundo reactor, con las más altas a partir de la primera semana del primero. Por otro lado, la calidad del gas dependerá del sustrato que tenga el tanque caja y de una estrategia eficaz en la optimización de la recirculación del percolado.

9.9. Parada de los reactores

Los reactores se detendrán a los 47 días, tiempo en el cual se deja de generar el suficiente biogás con la calidad que buscamos. Una vez abiertos nos encontramos que la cantidad de materia prima que había en su interior ha disminuido en volumen, siendo la masa del material digerido del primer reactor 1,57 kg y del segundo 1,52 kg.



Todo lo que no se puedan comer los microorganismos en la biodigestión como por ejemplo huesos, pepitas de fruta, piel de patata, y sucedáneos, se quedará en el fondo de los reactores. La digestión anaerobia seca es mucho más tolerante respecto a todo este tipo de residuos, sin embargo, estas impurezas podrían provocar una obstrucción y por lo tanto un mal funcionamiento de todo el recorrido en la digestión anaerobia húmeda. El resto del material que sí se pudo degradar en el tanque de caja fue convertido en biogás.



Figura 9.14. Vista del contenido de los reactores después del proceso de biometanización.



10. COMPARACIÓN DE ESTUDIOS

10.1. Instalaciones y funcionamiento

Siendo conscientes que el estudio anterior es a escala de laboratorio, nos basaremos también en la primera planta de digestión anaerobia por vía seca situada en Gorizia, al nordeste de Italia. Estos datos sobre la investigación están sacados del artículo publicado por Alessandro Chiumenti llamado: “Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation”. [27]

El artículo detalla el monitoreo de la planta con una duración de 487 días, que fue abastecida con: estiércol, hierva de centeno, alfalfa, paja y ensilaje de maíz. Con los datos obtenidos lo compara con el rendimiento de una planta de digestión por vía húmeda. En nuestro caso, solo nos centraremos en la información que se obtiene sobre la calidad del sustrato, la recirculación del inóculo o la calidad del metano para compararlos con los datos obtenidos en el laboratorio.



Figura 10.1. Vista de la planta de digestión anaerobia por vía seca en detalle. [27]



El objetivo de la investigación de Alessandro Chiumenti es, como hemos mencionada antes, el monitoreo de una granja de vacas para la posterior evaluación de una planta de fermentación seca a gran escala durante un periodo no superior a 500 días. La granja consta de mil vacas, y el estiércol que generan se obtiene en formato sólido. Como se puede ver en la imagen de arriba se compone por 11 celdas de células anaerobias equipadas con una puerta de acero, semejantes a la figura de un garaje, de ahí el nombre de reactores de tipo garaje. Cada celda está fabricada de hormigón armado y con un sistema de calefacción dentro de cada una.

La temperatura de los reactores coincide con la del otro estudio, ajustándose a 38°C. Los reactores de esta planta tienen unas dimensiones de: 30 m (longitud) x 7 m (ancho) x 5 m (altura). Esta información nos proporciona aspectos prácticos de los parámetros que no se pueden obtener con pruebas a nivel de laboratorio. Por ejemplo, a la hora de cargar o descargar el sustrato hay que tener en cuenta que la operación será discontinua, por consecuencia esta operación será dedicada a la creación del inóculo. Un proceso, que como hemos visto en el caso práctico anterior, es esencial para la eficiencia del proceso y su optima degradación.

En cada reactor, habrá una serie de canales que recolectarán el percolado, que harán posible la recirculación por medio de aspersores situados en el techo y que por medio de bombas acabarán en el tanque de percolado. Esta recirculación tiene como finalidad la mejora de la compactación y humedad del sustrato dentro de los digestores, rociando este inóculo sobre la materia orgánica.

El biogás recolectado se guarda en bolsas situadas en la parte alta del reactor, teniéndolas que enfriar para poder suprimir el vapor de agua que se encuentra en su interior. Estas bolsas tienen una capacidad de 500 m^3 y su material es de poliéster.



10.2. Enfoque experimental y muestra de datos

El proceso duró un total de 487 días y se puede dividir en dos fases. Una primera fase inicial que se extendió por varios meses en la que se vio como el biogás iba incrementándose, y una fase correspondiente a los últimos 62 días, es decir del día 424 al 486, en el que las condiciones de la planta se presentaron muy estables.

La materia prima que se introdujo en cada reactor vario durante los días del proceso, pero de media se utilizó en estiércol un 67,4%, de ensilaje de maíz un 25,6%, de alfalfa un 3.9%, de hierva de centeno un 2%, de triticales un 0,6% y de paja un 0,4%. En la primera fase el sustrato promedio resulto de 224,4 t y en la segunda fase 293,7 t.

Tabla 10.1. Masa media de materia prima introducida en el reactor.

Materia prima	Masa media (ton)
Estiércol	150,4 t
Ensilaje de maíz	59,3 t
Hierva de centeno	13,7 t
Alfalfa	23,0 t
Triticales	84,8 t
Paja	7,3 t

En la tabla que tenemos a continuación, podemos observar los primeros datos que se obtienen de la materia prima que se introduce en los reactores. En esta podemos examinar algunas características mencionadas en el otro estudio, como, por ejemplo: los sólidos totales, sólidos volátiles, el PH, la demanda química de oxígeno, el nitrógeno, los ácidos grasos volátiles y por último la alcalinidad.



Tabla 10.2. Características químicas de la materia orgánica introducida en el reactor.
[27]

	TS (%)	VS (% TS)	pH	COD (g/kg)	TKN (g/kg)	Norg (g/kg)	N-NH ₄ ⁺ (g/kg)	VFA (mgCOD/g)	Alkalinity (gCaCO ₃ /kg)	VFA/Alkalinity
Manure	19.8 ± 1.3	85.7 ± 3.2	8.57 ± 0.35	n.d.	4.55 ± 0.31	2.97 ± 0.21	1.58 ± 0.43	9.38 ± 0.66	10.20 ± 0.71	0.92 ± 0.06
Corn silage	35.7 ± 1.9	95.3 ± 1.2	4.08 ± 0.10	n.d.	4.10 ± 0.28	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Rye grass	25.1 ± 1.2	87.1 ± 2.0	4.16 ± 0.11	n.d.	14.00 ± 0.90	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Alfalfa	25.0 ± 1.3	88.7 ± 1.1	n.d.	n.d.	16.05 ± 1.21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Triticale	29.8 ± 2.1	94.6 ± 1.2	4.04 ± 0.09	n.d.	5.40 ± 0.33	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Straw	89.2 ± 4.2	95.7 ± 0.9	n.d.	n.d.	5.30 ± 0.11	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Input mix	21.9 ± 2.3	81.4 ± 7.2	7.84 ± 0.21	204.4 ± 21.1	5.05 ± 0.56	3.15 ± 0.35	1.90 ± 0.20	n.d.	n.d.	n.d.
Leachate	n.d.	n.d.	8.45 ± 0.10	29.5 ± 1.8	4.93 ± 0.23	1.60 ± 0.08	3.33 ± 0.17	7.32 ± 0.37	13.98 ± 0.70	0.52 ± 0.03
Digestate	13.4 ± 1.1	76.1 ± 3.9	9.07 ± 0.12	133.6 ± 6.1	5.26 ± 0.29	2.43 ± 0.14	2.83 ± 0.16	8.35 ± 0.61	32.4 ± 0.26	0.26 ± 0.02

Esta mezcla de abono, ensilaje de maíz, hierva de centeno, alfalfa, triticale y paja no fue tratada de ninguna forma. Todos los componentes fueron insertados en forma de sólido, con un contenido de sólidos totales del 22% y de sólidos volátiles del 81%. En la tabla los sólidos volátiles muestran una degradación adecuada para el tipo de material, aunque hay que tener en cuenta que la calidad del sustrato depende mucho de este factor. Como consecuencia de esta degradación se ve multiplicada la humedad. Este proceso de fermentación reduce en un 40% los sólidos totales y un 43% los sólidos volátiles, siendo de 204,4 g DQO/L. La recirculación promedio en cada digestor es de 45% para los materiales de la tabla. La recirculación de la carga del digestato tiene unos datos medios de 191,1 t.

Al igual que en el supuesto práctico anterior, en esta planta de fermentación seca se procede a un aumento de la recirculación al inicio y se procede a bajarla paulatinamente a medida que avanza todo el proceso. Esta recirculación es determinante para la optimización del biogás y su buen rendimiento.

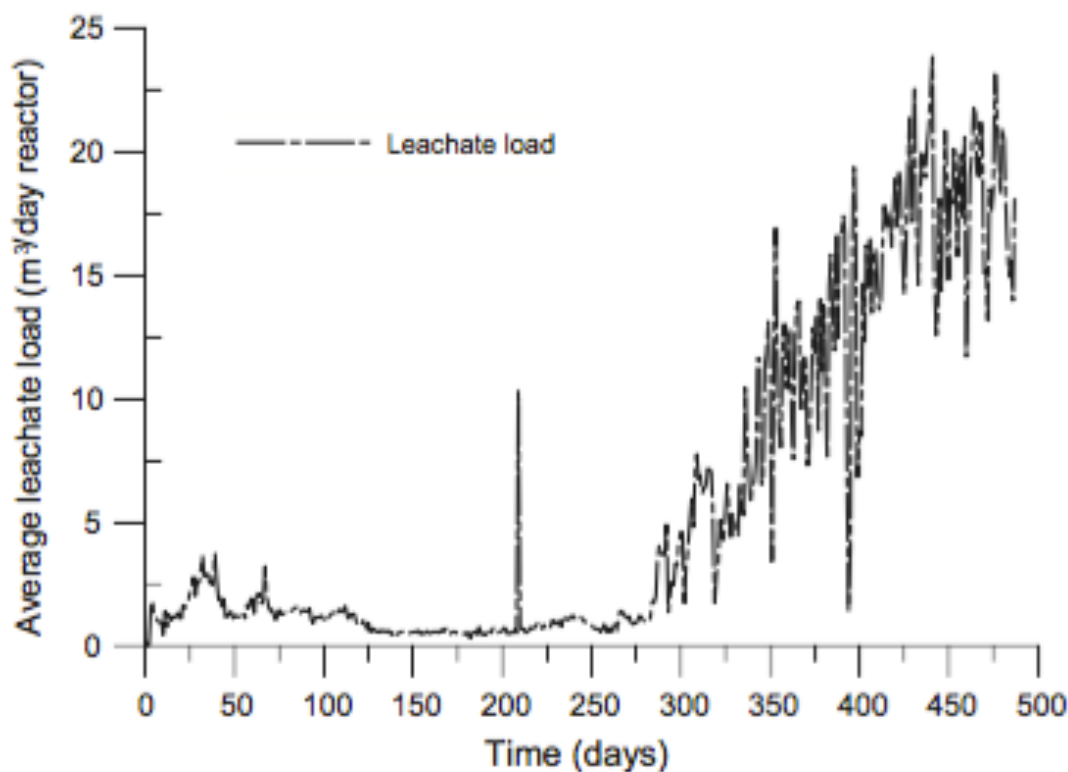


Figura 10.2. Lectura del percolado. [27]

En la gráfica donde se muestra el percolado, se puede apreciar picos variables. Concretamente en el día 214 se ve un pico y a partir del día 297 hay numerosas subidas y bajadas. Los primeros 300 días, a excepción del pico, se mete una carga de lixiviado en el reactor constante, después se irá incrementando de forma creciente, como hemos visto en el otro estudio. Esta manera de tratar la recirculación del percolado es especialmente efectiva.

En la gráfica que tenemos a continuación, se puede comprender mejor la composición del biogás que se obtiene de estos reactores. Los gases que se monitorearon y que se muestran seguidamente son metano (verde), dióxido de carbono (rojo), oxígeno (azul) en proporciones variables y ácido sulfhídrico (naranja). La media de gas metano que se obtuvo en todo el desarrollo fue de 54%, teniendo algún pico mayor de hasta el 63%. En cambio, como se muestra en la gráfica, el CO_2 tuvo dos fases muy marcada, los primeros



300 días con unas concentraciones de menos de un 40% y los días posteriores por consecuencia del aumento del percolado llegaron a rondar el 50%. El ácido que se muestra es consecuencia biológica de la fermentación, eliminándose con dosis controladas de oxígeno en el reactor.

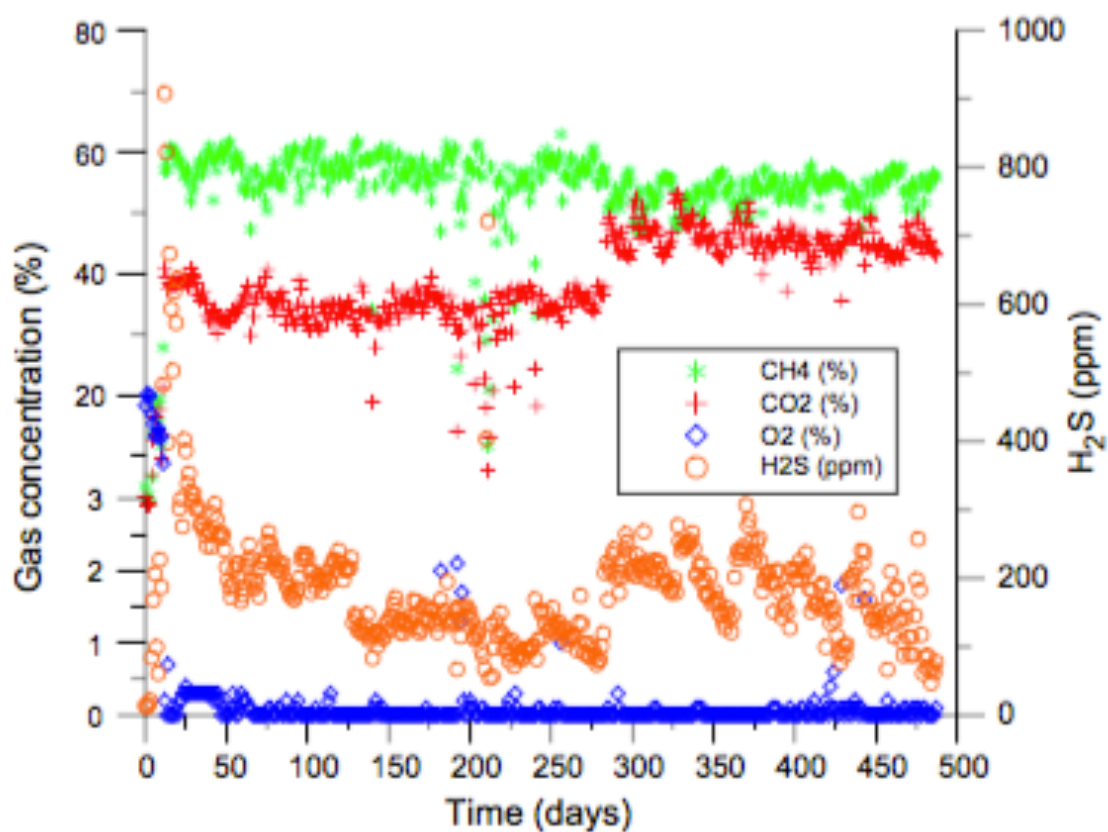


Figura 10.3. Monitoreo del periodo de la composición del biogás. [27]



10.3. Resultado final y conclusiones

Aunque al inicio del tratamiento se haya demorado más por la fase de arranque, que llegó a durar diversos meses, esto fue debido a: ajustes en la carga, la recirculación y el percolado. La primera fase del proceso se considera como de avituallamiento, mientras que la última fase, es decir, los últimos 62 días desde el inicio, donde hubo una reducción del 20% en cuanto a la recirculación del percolado se considera la más estable y la más rentable. Teniendo en cuenta que es la primera vez que se hacía a gran escala los resultados han sido satisfactorios.

Podemos comprobar que, aun siendo una planta a gran escala con 11 celdas, los parámetros a la hora de monitorearla son los mismo que en el supuesto práctico hecho en el laboratorio.



11.CONCLUSIONES

Este estudio tiene como fin, demostrar que una forma de energía alternativa es factible con los recursos que desaprovechamos. Un tipo de energía neutra, menos contaminante para el medio ambiente, y capaz de abastecerse por medios naturales. La biodegradación de los desperdicios en los alimentos, que actualmente son un problema para los vertederos por su alto contenido en materia orgánica produciendo metano, CO_2 y lixiviaciones en los suelos, genera un dilema sobre el consumo y la precariedad energética que necesitamos para suministrar toda la industria y tecnología que adquirimos en nuestra sociedad basada en el gasto constante. Dotándonos de estas premisas, una de las soluciones que se ofrece a esta disyuntiva es la digestión anaerobia. Por medio de estas páginas y apoyándonos de otros estudios comparativos y proyectos de laboratorio, plantearemos y explicaremos esta digestión por medio seco. Una alternativa novedosa que se está llevando a cabo en países precursores como Francia y Alemania que apuestan por las nuevas energías limpias, siendo hoy en día pioneros en este tipo de reactores.

Teniendo en cuenta que buscamos un sistema muy concreto a nivel de laboratorio con desperdicios generados en la cafetería de la facultad, hemos tanteado otros estudios a gran escala con diferentes tipos de inóculo (líquido y sólido) para demostrar que ambos proyectos llegan a un fin común. La propia viabilidad de los resultados y los buenos rendimientos que estos generan tanto en pequeñas escalas como en sistemas más industrializados, dan una visión positiva a la problemática de los deshechos que generamos tanto en el hogar, como en empresas y distribuciones alimentarias. Estas páginas demuestran y explican a base de información detallada, con datos de ensayos explicados gráficamente, la digestión anaerobia seca con reactores de tipo garaje. De la que no se dispone mucha información, pero que mediante la recolección de documentos se puede apreciar que es un tipo de energía con mucho futuro.



Estudio técnico sobre aplicabilidad de la tecnología de digestión anaerobia seca para la conversión de residuos de alimentos en biogás.



En una primera instancia, comprobamos que estos sistemas por medio del inóculo líquido lo hacen mucho más eficaces. Al no requerir de ningún pretratamiento de la materia orgánica, lo hace sencillo a la hora de procesar todo el residuo, tratándose de pequeñas impurezas, como pueden ser, los huesos o pepitas de fruta mencionadas anteriormente. Como hemos visto en el supuesto práctico que se ha llevado a cabo por los investigadores Carlos Rico y Amaya Lobo, la recirculación del inóculo debe tener una estrategia específica, de lo contrario los resultados del biogás se verían afectados drásticamente. Los dos reactores con los que se ha procedido a hacer las pruebas de laboratorio, han tenido secuelas parecidas en cuanto a la producción de metano. La conclusión a la que se llegó con ambos desenlaces es que una vez comenzado el proceso de la digestión es preferible empezar con una tasa más baja de recirculación en el percolado y una vez vaya avanzando este tratamiento ir subiéndola progresivamente. También hay que tener en cuenta, que se ha comprobado que tres parámetros han sido decisivos a la hora de ir nivelando esta recirculación del percolado. El PH y la concentración de ácidos grasos son una señal evidente a la hora de seleccionar una buena optimización y rendimiento para la obtención de biogás de buena calidad.

En cambio, en el segundo proyecto llevado a cabo en una planta de fermentación seca en Italia por Assesandro Chiumenti podemos comprobar que, aunque los primeros meses hayan sido de aclimatación, los resultados obtenidos de metano en las 11 celdas han llegado a un rendimiento por encima del esperado. Uno de los parámetros que se ha tenido en cuenta, al igual que el supuesto práctico de laboratorio, es la recirculación del percolado. Al principio se ha utilizado una recirculación constante, para que, a medida que se iba biodegradando la materia prima, ir aumentándola y así ver un incremento en la creación de biogás.



Este estudio determina que la digestión anaerobia por vía seca genera un menor impacto ambiental, al utilizarse los residuos que tengan materia orgánica como fuente de energía y no desecharlos al medio natural. Si estos residuos no se tratan acaban generando basuras que contaminan nuestro entorno, creando gases de efecto invernadero y emponzoñan el suelo. De esta manera evitamos que los vertederos queden saturados por estos desechos y que sean reutilizados en forma de fertilizantes y abonos para el terreno.



12. BIBLIOGRAFIA

Trabajos citados

[1] Verde, L., s.f. *Linea verde*. [En línea]

Available at: <http://www.lineaverdealgete.com/lv/consejos-ambientales/piensa-alimentate-ahorra/como-influye-el-desecho-de-los-alimentos-en-el-medio-ambiente.asp>

[Último acceso: 14 diciembre 2019].

[2] FAO, 2013. *FAO*. [En línea]

Available at: <http://www.fao.org/news/story/es/item/196368/icode/>

[Último acceso: 15 diciembre 2019].

[3] Edwiges, T., 2018. Methane potential of fruit and vegetable waste: an evaluation of the semi-continuous anaerobic mono-digestion. *Environmental Technology*, Septiembre.

[4] Fisgativa, H., 2016. Characterizing the variability of food waste quality: A need for efficient valorisation through anaerobic digestion. *ELSEVIER*, abril, Volumen 50, pp. 264-274 .

[5] Jin, Y., 2015. Life-cycle assessment of energy consumption and environmental impact of an integrated food waste-based biogas plant. *ELSEVIER*, Agosto, Volumen 151, pp. 227-236.

[6] Anyaoku, C. C., 2018. Decentralized anaerobic digestion systems for increased utilization of biogas from municipal solid waste. julio, Volumen 90, pp. 982-991.

[7] Maria, F. D., 2018. Are EU waste-to-energy technologies effective for exploiting the energy in bio-waste?. *ELSEVIER*, noviembre. pp. 1557-1572 .



[8] Rico, C., 2020. Dry batch anaerobic digestion of food waste in a box-type reactor system: Inoculum preparation and reactor performance. *Journal of Cleaner Production*, Abril.Volumen 251.

[9] Wold, B., s.f. *Biogas Wold*. [En línea]

Available at: <https://www.biogasworld.com/product/anaerobic-digestion/naskeo-environnement-dry-batch-process/>

[Último acceso: 10 diciembre 2019].

[10] Piñeiro, J. P., 1994. *Vertederos controlados. Problemática de los lixiviados*. s.l.:CSIC.

[11] Millán, A. S., 2018. *Estudio técnico sobre digestores anaeróbicos aplicado al tratamiento de la fracción orgánica de los residuos municipales*. España(Cantabria): s.n.

[12] IDAE, 2016. *IDAE*. [En línea]

Available at: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>

[Último acceso: 20 diciembre 2019].

[13] M.Braguglia, C., 2018. Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review. *ELSEVIER*, junio, Volumen 248, pp. 37-56.

[14] Zhang, J., 2017. Three-stage anaerobic digester for food waste. *ELSEVIER*, mayo, Volumen 194, pp. 287-295 .

[15] Pacheco, C. A. M., 2015. *Digestión Anaerobia En Vía Seca. Diseño De Tratamiento de Fangos Generados en Estación Depuradora De Aguas Residuales*. Valladolid : Universidad de Valladolid.

[16] Reith, J., 2003. Bio-methane & bio-hydrogen. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production.. *Petten*.



[17] **Rodríguez, J. F., 2010.** *Optimización de la digestión anaerobia seca de la fracción orgánica de sólidos urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura.* Cadiz: Universidad de Cadiz.

[18] **Caritas, N. d. I. T., 2008.** *Digestión Anaerobia en Comunidades Rurales.* Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

[19] **Seadi, T. A., 2008.** *Biogas Handbook.* s.l.:s.n.

[20] **Bekon, s.f. Bekon.** [En línea]

Available at: <https://www.bekon.eu/en/technology/>

[Último acceso: 10 diciembre 2019].

[21] **García, A. L., 2017.** *Producción de biogás a partir de residuos: tecnologías y estrategias de gestión.*, Santander: s.n.

[22] **André, L., 2018.** Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. *ELSEVIER*, junio, Volumen 247, pp. 1027-1037 .

[23] **Kusch, S., 2011.** Dry Digestion of Organic Residues. *Integrated Waste Management*, Agosto.Volumen I.

[24] **El-Mashad, H. M., 2006.** Effect of Inoculum Addition Modes and Leachate Recirculation on Anaerobic Digestion of Solid Cattle Manure in an Accumulation System. *ELSEVIER*, Octubre, Volumen 95, pp. 245-254 .

[25] **Kusch, S., 2012.** Effect of various leachate recirculation strategies on batch anaerobic digestion of solid substrates. *International Journal of Environment and Waste Management (IJEWM)*, Volumen 9.



[26] **Veeken, A., 2000.** Effect of substrate-seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of biowaste. *Water Sci Technol*, febrero, Volumen 41, p. 255–262.

[27] **Chiumenti, A., 2018.** Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation. *ELSEVIER*, Junio, Volumen 71, pp. 704-710 .

[28] **Angelonidi, E., 2015.** A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. *Water and environmental journal*, noviembre, Volumen 29, pp. 549-557.

[29] **Avendaño, D., 2010.** Diseño y Construcción de un Digestor Anaerobio de Flujo Pistón que Trate los Residuos Generados en una Explotación Ganadera de la Localidad de Loja, Ecuador, Empleando Tecnologías Apropriadas.. *Universidad politecnica de Madrid*.

[30] **FAO, 2013.** *FAO*. [En línea]
Available at: <http://www.fao.org/3/i3347e/i3347e.pdf>
[Último acceso: 16 noviembre 2019].

[31] **Kothari, R., 2014.** Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, pp. 174-195.

[32] **Muerza, Á. F., 2019.** *eco vidrio*. [En línea]
Available at: https://hablandoenvidrio.com/como-nos-afecta-el-cambio-climatico/?gclid=EAlalQobChMI6bqkoZrM5gIVUkHTCh3_jwRWEAAYASAAEgL-Z_D_BwE
[Último acceso: 28 noviembre 2019].

[33] **NatGeo, 2010.** *National Geographic*. [En línea]
Available at: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>
[Último acceso: 20 diciembre 2019].



Estudio técnico sobre aplicabilidad de la
tecnología de digestión anaerobia seca
para la conversión de residuos de alimentos
en biogás.



[34] Waste, Z., s.f. ZEROWASTE. [En línea]

Available at: <https://zerowasteenergy.com/downloads/>

[Último acceso: 4 diciembre 2019].

[35] Huertas, R. A. P., 2015. Digestión anaerobica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación a la industria alimentaria.. Producción + Limpia, diciembre, 10(2), pp. 142-159.

[36] ACCIONA, 2019. ACCIONA. [En línea]

Available at: <https://www.acciona.com/es/cambio-climatico/>

[Último acceso: 2019 diciembre 2].